

**Kräftegleichgewicht vs. Wechselwirkungsgesetz – Konzeption und Evaluation zweier Unterstützungsmaßnahmen zur Unterscheidung beider Konzepte****Julia Wöllermann, Michael Kahnt, Roland Berger**Universität Osnabrück, FB 4 / Physikdidaktik, Barbarastr. 7, 49076 Osnabrück  
[jwoellermann@uni-osnabrueck.de](mailto:jwoellermann@uni-osnabrueck.de)**Kurzfassung**

Als Element von Science Literacy ist die Unterscheidung von Kräftegleichgewicht und Wechselwirkungsgesetz auch wichtiger Gegenstand der Curricula der Sekundarstufe I. Allerdings zeigt sich, dass Schülerinnen und Schüler die beiden Konzepte häufig miteinander verwechseln. Um den Schwierigkeiten der Unterscheidung zu begegnen, wurden zwei Unterstützungsmaßnahmen entwickelt und in 12 Klassen der achten Jahrgangsstufe an Gymnasien verglichen. Dabei zeigte sich, dass sowohl eine Unterstützungsmaßnahme bestehend aus einer Kombination aus Kontrastierung und „Freischneiden“ (grafischer Hilfe) als auch eine Unterstützungsmaßnahme bestehend aus einer Kombination aus Kontrastierung und einer eher formalen Hilfe wirksam die Unterscheidung von Kräftegleichgewicht und Wechselwirkungsgesetz fördern.

**1. Hintergrund**

„Kraft und Gegenkraft greifen am gleichen Körper an“ [1]. Diese und ähnliche Aussagen tätigen Schülerinnen und Schüler nach dem Mechanikunterricht nicht selten. Obwohl die Unterscheidung von Kräftegleichgewicht und Wechselwirkungsgesetz als Element von Science Literacy [2] auch wichtiger Gegenstand der Curricula der Sekundarstufe I (z. B. [3]) ist, fällt Schülerinnen und Schülern die Unterscheidung häufig nicht leicht [1]. Diese Schwierigkeiten können an ungeschickten Bezeichnungen wie bspw. „actio = reactio“ liegen, die zu inkorrekten Interpretationen führen [4], wie auch auf fehlende Hilfestellungen hindeuten.

In unserer Vergleichsstudie greifen wir diese Aspekte auf. Als „grafische Hilfe“ führen wir das „Freischneiden“ ein. Während das Freischneiden in Deutschland hauptsächlich in den Ingenieurwissenschaften Verwendung findet (z. B. [5]), ist es im englischsprachigen Raum im Kontext Schule unter dem Namen „Free-Body Diagrams“ relativ weit verbreitet (z. B. [6]). Eine Einführung des Freischneidens erscheint auch wegen der damit verbundenen Systembetrachtungen lohnenswert. Diese ermöglichen eine Erweiterbarkeit im Hinblick auf Systemgrenzen bei energetischen Betrachtungen [7].

In Anlehnung an die im Unterricht häufig verwendete Betrachtung von Kraftpfeilbeschriftungen wurde eine „formale Hilfe“ entwickelt. Diese hebt die Betrachtung von Kraftpfeilbeschriftungen, die in Anlehnung an die von [8] vorgeschlagene Sprechweise

in der Notation  $\vec{F}_{\text{Körper 1 auf Körper 2}}$  erfolgen, explizit hervor.

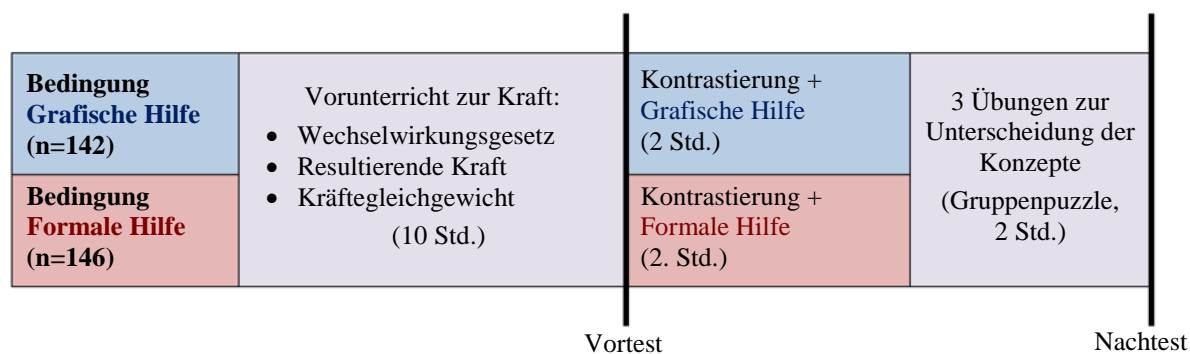
Für das Unterscheiden zweier leicht verwechselbarer Konzepte ist die Methode des Kontrastierens günstig [9]. In beiden Vergleichsgruppen werden daher vor der Einführung der grafischen bzw. formalen Hilfe die beiden Konzepte einander gegenüber gestellt. Die Kombination aus Kontrastierung und der grafischen bzw. formalen Hilfe wird im Folgenden als „Unterstützungsmaßnahme“ bezeichnet.

Unsere Fragestellung lautet daher: Führt die Unterstützungsmaßnahme aus Kontrastierung und grafischer Hilfe zu besseren Lernleistungen als die Unterstützungsmaßnahme aus Kontrastierung und formaler Hilfe?

**2. Methode****2.1. Design und Ablauf**

Die beiden Unterstützungsmaßnahmen wurden im Schuljahr 2018/19 in 12 Klassen der 8. Jahrgangsstufen an niedersächsischen Gymnasien im Rahmen einer quasi-experimentellen Vergleichsstudie evaluiert. Den Bedingungen wurden jeweils 6 Klassen zufällig zugewiesen (grafische Hilfe: n=142, formale Hilfe: n=146).

Insgesamt wurde der Unterricht von 9 verschiedenen Lehrkräften durchgeführt, wobei eine Lehrkraft mit 4 Klassen an der Studie teilnahm. Jeweils 2 der von dieser Lehrkraft betreuten Klassen wurden einer der beiden Bedingungen grafische bzw. formale Hilfe zugewiesen. Die teilnehmenden Lehrkräfte führten den Unterricht selbst aus.



**Abb. 1:** Ablaufplan der Studie. In einem zehnstündigen Vorunterricht wurde das Thema Kraft von der Einführung bis zum Wechselwirkungsgesetz und dem Kräftegleichgewicht als Spezialfall der resultierenden Kraft unterrichtet. Es folgte ein Vortest, für den eine Schulstunde zur Verfügung stand. Anschließend wurden die Unterstützungsmaßnahmen in zwei Schulstunden eingeführt und in zwei weiteren Schulstunden im Rahmen eines Gruppenpuzzles die Unterscheidung der Konzepte Kräftegleichgewicht und Wechselwirkungsgesetz geübt. Daran schloss sich der Nachtest an.

Abb. 1 zeigt den Ablauf der Studie. Da die Unterstützungsmaßnahmen erst bei der Unterscheidung der Konzepte Kräftegleichgewicht und Wechselwirkungsgesetz ansetzen, basieren sie auf Vorkenntnis von Kräften, Kräftegleichgewicht und Wechselwirkungsgesetz. Aus diesem Grund wurde das Thema Kraft in den teilnehmenden Klassen anhand eines vorgegebenen zehnstündigen Vorunterrichts von Beginn an eingeführt. In diesen Unterrichtsstunden wurden ausführlich das Kräftegleichgewicht als Spezialfall der resultierenden Kraft und das Wechselwirkungsgesetz besprochen (vgl. Abb. 1). Um Schwierigkeiten mit den Begrifflichkeiten zum Wechselwirkungsgesetz zu vermeiden, wurden außerdem die Kräftepaare beim Wechselwirkungsgesetz in Anlehnung an [10] als Zwillingsskräfte bezeichnet.

Anschließend erfolgte ein Vortest, für den eine Unterrichtsstunde zur Verfügung stand. Diesem folgte in zwei Unterrichtsstunden die Einführung der Unterstützungsmaßnahmen, die in Kap. 2.2 näher erläutert werden. Es folgten drei Übungen zur Unterscheidung der Konzepte Kräftegleichgewicht und Wechselwirkungsgesetz, die im Rahmen eines Gruppenpuzzles durchgeführt wurden.

Die Kontrastierung und die Hilfe sehen wir als integrale Einheit an, da eine Hilfe zur Problemlösung nur dann als hilfreich erscheint, wenn das Problem von den Schülerinnen und Schülern (durch Kontrastierung der Konzepte) überhaupt gesehen wird. Daher haben wir uns entschieden, die Kombination aus Kontrastierung und Hilfe gemeinsam zu testen.

Abschließend wurde ein Nachtest geschrieben, für den eine Unterrichtsstunde zur Verfügung stand.

Um die Vergleichbarkeit zwischen den Bedingungen möglichst gut zu sichern, wurden die Lehrkräfte an zwei Nachmittagen (5 Stunden gesamter Zeitaufwand) geschult. In einer Schulung wurde der Vorunterricht besprochen und in der zweiten Schulung wurden die Unterstützungsmaßnahmen explizit vorgestellt, geübt und der zugehörige Unterricht besprochen. Zusätzlich bekamen die Lehrkräfte tabellarische Verlaufspläne sowie einen exemplarisch

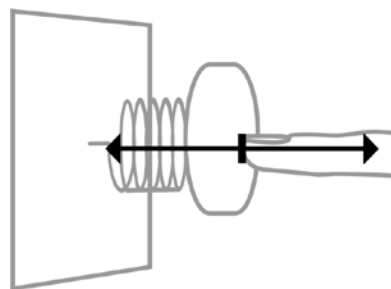
ausformulierten Verlauf der Unterrichtsstunden.

Für beide Bedingungen waren der Unterrichtsablauf wie auch die Übungen bis auf die Einführung und Nutzung der jeweiligen Hilfe identisch, sodass sich die beiden Vergleichsgruppen nur in der Art der bereitgestellten Hilfe unterschieden.

## 2.2. Der Unterricht

Die an den Vorunterricht anschließende Kontrastierung von Zwillingsskräften und Kräftegleichgewicht geschieht nach dem Vortest mittels Tab. 1. Mit deren Hilfe stellen die Schülerinnen und Schüler die Eigenschaften beider Konzepte einander gegenüber. Es wird ersichtlich, dass die Differenzierung beider Konzepte durch Betrachtung des Angriffspunktes ermöglicht wird. Bei Zwillingsskräften liegen die beiden Angriffspunkte in zwei verschiedenen Körpern, während sie beim Kräftegleichgewicht im selben Körper liegen.

Eingeführt wird die grafische bzw. formale Hilfe mittels des Beispiels „Drücken eines Klingelknopfes“. Dazu wird in Anlehnung an [7] folgendes Paradoxon formuliert:



**Abb. 2:** "Drücken eines Klingelknopfes"

*Wenn du den Klingelknopf drückst, übst du eine Kraft auf die Klingel aus. Nach dem Wechselwirkungsgesetz übt der Klingelknopf eine Zwillingsskraft aus, die genauso groß und entgegengesetzt gerichtet ist. Wenn du stärker drückst, wird auch die Zwillingsskraft größer. Aber wenn beide Kräfte gleich groß sind, dann*

		Zwillingskräfte	Kräftegleichgewicht
Wie viele Kräfte sind beteiligt?		2	Mindestens 2
Wenn beim Kräftegleichgewicht zwei Kräfte beteiligt sind:	Welche Richtung haben die beiden Kräfte?	<i>Die beiden Kräfte sind entgegengesetzt gerichtet.</i>	
	Welche Stärke haben die beiden Kräfte?	<i>Die beiden Kräfte sind gleich groß.</i>	
	Wo befindet sich der Angriffspunkt der beiden Kräfte?	<i>An verschiedenen Körpern. (An jedem der beteiligten Körper greift jeweils eine Kraft an.)</i>	<i>Am selben Körper.</i>
	Welche Wirkung haben die Kräfte auf den Körper?	<i>Die Kräfte beschleunigen jeweils den Körper, an dem sie angreifen.</i>	<i>Der Körper ändert seine Bewegung nicht.</i>

**Tab. 1:** Kontrastierung von Zwillingskräften und Kräftegleichgewicht. Diese Tabelle wurde an die Schülerinnen und Schüler ausgeteilt und gemeinsam mit ihnen ausgefüllt (kursiv). Es wird ersichtlich, dass der Angriffspunkt der Kräfte ein entscheidendes Unterscheidungsmerkmal darstellt.

*heben sich die Kräfte auf und der Klingelknopf kann sich gar nicht bewegen.*

Dieses Beispiel ist hinreichend schwierig, um die Verwendung der Hilfen zu motivieren. Es dient im Folgenden zur Illustration der beiden Hilfearten.

Den Schülerinnen und Schülern wird zur Lösung des Problems das rezeptartige Vorgehen in Abb. 3 in frontaler Form vorgestellt. Zunächst werden zur Lösung des Problems bei beiden Hilfearten die Kraftpfeile beschriftet. Anschließend erfolgt die Kennzeichnung der Zwillingskräfte entsprechend Schritt 1 in Abb. 3 und die Klärung, dass der Bewegungszustand des Klingelknopfes zu betrachten ist.

### 2.2.1. Grafische Hilfe

Der Klingelknopf wird entsprechend Schritt 2a) in der linken Spalte von Abb. 3 umrandet. Dabei wird betont, dass darauf zu achten ist, dass alle an dem Klingelknopf angreifenden Kräfte innerhalb der Umrandung liegen und alle Kräfte, die nicht an dem Klingelknopf angreifen, außerhalb der Umrandung. Durch diesen Schritt werden die an dem Klingelknopf angreifenden Kräfte optisch von ihren Zwillingskräftepartnern, die außerhalb der Umrandung liegen, abgegrenzt.

Alle Körper und Kraftpfeile, die nicht innerhalb der Umrandung liegen, werden gemäß Schritt 2b) entfernt. Dazu entfernt die Lehrkraft die magnetisch an der Tafel befestigte Klingelknopfhalterung und den Finger.

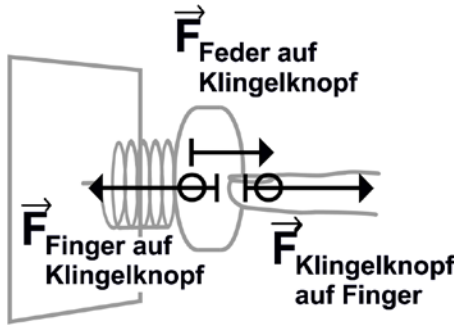
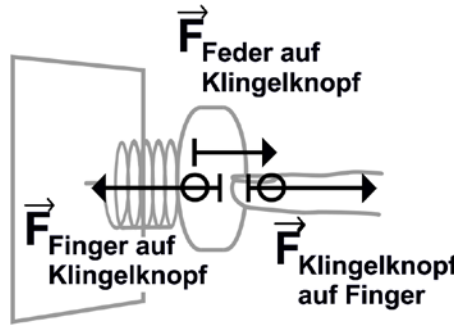
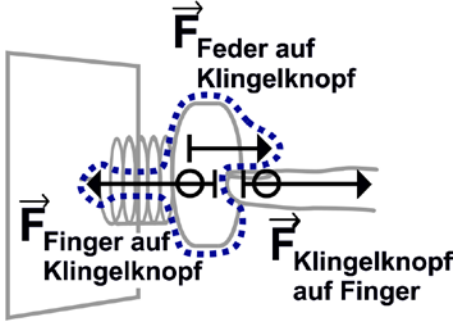
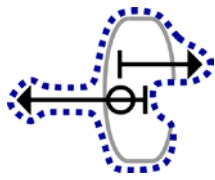
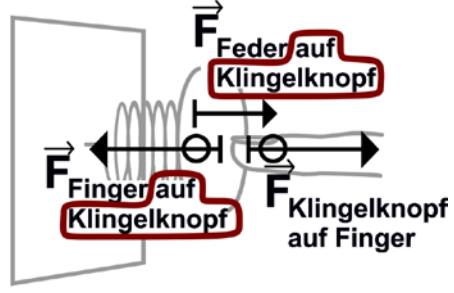
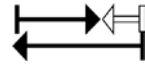
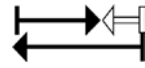
Im letzten Schritt 3 wird die resultierende Kraft bestimmt, indem alle innerhalb der Umrandung liegenden Kraftpfeile addiert werden. So wird ersichtlich, dass am Klingelknopf kein Kräftegleichgewicht vorliegt.

In der anschließend von den Schülerinnen und Schülern selbstständig durchgeführten Aufgabe werden in Schritt 2b) mittels Scheren die nicht in der Umrandung liegenden Objekte entfernt. Im weiteren Verlauf des Unterrichts wird Schritt 2b) nicht mehr eingefordert.

### 2.2.2. Formale Hilfe

Die Beschriftungen der Kraftpfeile werden nach der Wortkombination „auf Klingelknopf“ durchsucht. Entsprechend Schritt 2 der rechten Spalte in Abb. 3 wird diese Wortkombination umrandet. Dabei wird ersichtlich, dass nur ein Partner der Zwillingskräfte eine Umrandung aufweist.

Anschließend erfolgt in Schritt 3 die Kräfteaddition aller Kraftpfeile, deren Beschriftung eine Umrandung aufweist. Daraus kann die resultierende Kraft bestimmt und die Frage, ob ein Kräftegleichgewicht am Klingelknopf vorliegt, geklärt werden.

Grafische Hilfe	Formale Hilfe
<p><b>1. Zwillingsskräfte markieren</b></p>  <p>Markieren der Zwillingsskräfte.</p>	<p><b>1. Zwillingsskräfte markieren</b></p>  <p>Markieren der Zwillingsskräfte.</p>
<p><b>2. Freischneiden</b></p> <p><b>a) Umranden</b></p>  <p>Umranden des Körpers, der betrachtet werden soll.</p> <p>Dabei darauf achten, dass</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• alle Kraftpfeile, die an dem Körper angreifen, innerhalb der Umrandung liegen,</li> <li>• kein Kraftpfeil innerhalb der Umrandung liegt, der nicht an dem Körper angreift.</li> </ul> <p><b>b) Ausschneiden</b></p>  <p>Entfernen aller Körper und Kraftpfeile, die außerhalb der Umrandung liegen.</p>	<p><b>2. Umranden</b></p>  <p>Durchsuchen der Beschriftungen nach den Worten „auf Körper“ und umranden dieser Worte.</p>
<p><b>3. Resultierende Kraft bestimmen</b></p>  <p>Um die resultierende Kraft zu bestimmen, sind alle in der Umrandung liegenden Kräfte zu addieren.</p>	<p><b>3. Resultierende Kraft bestimmen</b></p>  <p>Um die resultierende Kraft zu bestimmen, sind alle Kräfte, deren Beschriftungen umrandet sind, zu addieren.</p>

**Abb. 3:** Vorgehen der grafischen Hilfe (links) und formalen Hilfe (rechts). In Schritt 1 werden Zwillingsskräfte gekennzeichnet. Bei der grafischen Hilfe wird in Schritt 2 der Klingelknopf mitsamt der an ihm angreifenden Kräfte umrandet (a). Alle nicht in der Umrandung liegenden Objekte werden entfernt (b). Durch Addition der in der Umrandung liegenden Kraftpfeile kann die resultierende Kraft bestimmt werden (Schritt 3). Bei der formalen Hilfe werden in Schritt 2 die Beschriftungen nach den Worten „auf Klingelknopf“ durchsucht und die Wortkombination umrandet. Addition der Kraftpfeile, deren Beschriftung eine Umrandung aufweist, führt zur resultierenden Kraft (Schritt 3).

### Aufgabe 3

Alex hält einen Apfel in der Hand.



Betrachte die Kraft, die die Hand auf den Apfel ausübt und die Kraft, die die Erde auf den Apfel ausübt.

		richtig	falsch
Die von der Erde ausgeübte Kraft ist	<i>genauso groß</i>	X	
Die von der Erde ausgeübte Kraft ist	<i>größer</i>		X

Betrachte nun die Kraft, die die Hand auf den Apfel ausübt und die Kraft, die der Apfel auf die Hand ausübt.

		richtig	falsch
Die von der Hand ausgeübte Kraft ist	<i>genauso groß</i>	X	
Die von der Hand ausgeübte Kraft ist	<i>größer</i>		X

**Abb. 4:** Beispiel einer Basisaufgabe mit Lösung. Der erste Aufgabenteil umfasst zwei Items zum Kräftegleichgewicht, der zweite Aufgabenteil zwei Items zum Wechselwirkungsgesetz.

### 2.3. Testinstrument

Um das Verständnis der Schülerinnen und Schüler hinsichtlich des Kräftegleichgewichts, Wechselwirkungsgesetzes und der Unterscheidung beider Konzepte zu erfassen, wurden ein Vor- und ein Nachtest konzipiert.

Die Grundlage der Tests bilden acht im Folgenden als „Basisaufgaben“ bezeichnete Aufgaben, von denen eine Aufgabe die Beschriftung von Kraftpfeilen fordert und sieben Aufgaben Items im Multiple-Choice Format beinhalten. Eine dieser Aufgaben ist in Abb. 4 dargestellt. Der erste Aufgabenteil umfasst zwei Items zum Kräftegleichgewicht, der zweite Aufgabenteil zwei Items zum Wechselwirkungsgesetz. Ein Aufgabenteil wird nur dann als korrekt gelöst gewertet, wenn alle zugehörigen Items korrekt gelöst werden. Die Basisaufgaben werden unverändert im Vortest (19 Aufgabenteile:  $\alpha=.79$ ) und Nachtest (19 Aufgabenteile:  $\alpha=.77$ ) gestellt.

Der Nachtest beinhaltet zusätzlich drei Aufgaben, die im Folgenden „Transferaufgaben“ genannt werden. Diese Transferaufgaben sind nah an den drei

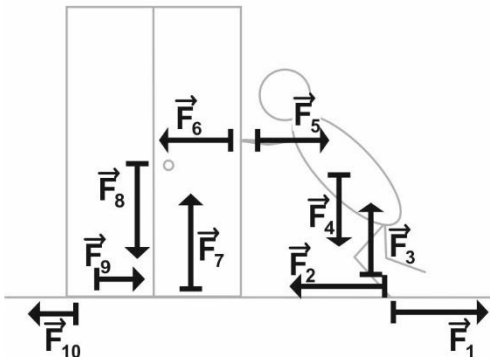
Aufgaben des Gruppenpuzzles formuliert, allerdings in anderen Kontexten (z. B. Schieben eines Schanks, Abb. 5).

Abb. 5 stellt Aufgabenteil a) einer solchen Transferaufgabe dar. Die Kraftpfeile waren bereits eingezeichnet und die Schülerinnen und Schüler sollten in Aufgabenteil a) für gegebene Kräftepaare ankreuzen, ob es sich um ein Kräftegleichgewicht, Zwillingkräfte, beides oder keins von beidem handelt. Bei der Korrektur wurde die zu jedem Kräftepaar gegebene Antwort bewertet. In Aufgabenteil b) und c) sollte anschließend ausgewählt werden, welche der zur Auswahl stehenden Kräfteadditionen zur Bestimmung der resultierenden Kraft an einem vorgegebenen Körper dient. Die insgesamt 21 Items der drei Transferaufgaben haben eine Reliabilität von Cronbachs  $\alpha=.88$ .

Korrekte Antworten wurden mit 1, inkorrekte oder nicht gegebene Antworten mit 0 codiert. Teilweise korrekte Antworten in der offenen Aufgabe wurden zudem mit 0,5 codiert.

### Aufgabe 11

Jan schiebt einen Schrank.

Situation:	
	$\vec{F}_1$ : Mensch auf Boden $\vec{F}_2$ : Boden auf Mensch $\vec{F}_3$ : Boden auf Mensch $\vec{F}_4$ : Erde auf Mensch $\vec{F}_5$ : Schrank auf Mensch $\vec{F}_6$ : Mensch auf Schrank $\vec{F}_7$ : Boden auf Schrank $\vec{F}_8$ : Erde auf Schrank $\vec{F}_9$ : Boden auf Schrank $\vec{F}_{10}$ : Schrank auf Boden

a) Kreuze an: Folgende Kräfte bilden...

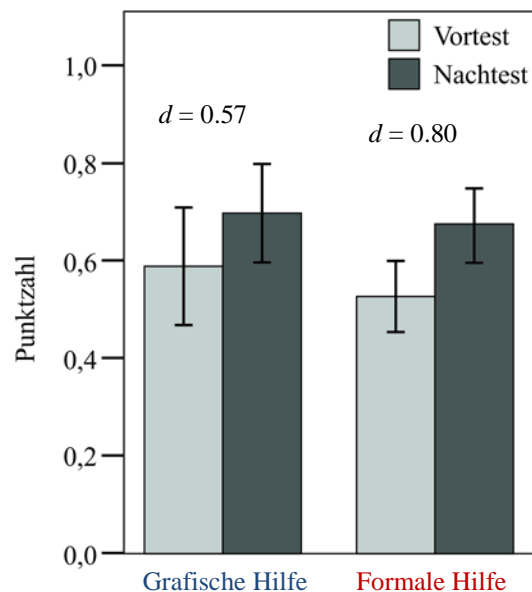
	... ein Kräftegleichgewicht	... Zwillingungskräfte	... ein Kräftegleichgewicht und Zwillingungskräfte	... weder ein Kräftegleichgewicht noch Zwillingungskräfte
$\vec{F}_1$ und $\vec{F}_3$				X
$\vec{F}_5$ und $\vec{F}_6$		X		
$\vec{F}_6$ und $\vec{F}_9$				X
$\vec{F}_7$ und $\vec{F}_8$	X			
$\vec{F}_9$ und $\vec{F}_{10}$		X		

**Abb. 5:** Beispiel einer Transferaufgabe mit Lösung. Dargestellt ist Aufgabenteil a). Zu zwei gegebenen Kräften ist anzukreuzen, ob sie ein Kräftegleichgewicht, Zwillingungskräfte, beides oder keins von beiden bilden. Auf die Darstellung von Aufgabenteil b) und c) wurde aus Platzgründen verzichtet.

### 3. Ergebnisse

Da alle Skalen eine ausreichende interne Konsistenz aufweisen (Cronbachs  $\alpha > .7$ ), wurden Mittelwerte aus den jeweiligen Aufgabenteilen bzw. Items (vgl. Kap. 2.3) der Tests gebildet (Tab. 2).

Die zweifaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren Messzeitpunkt (Basisaufgaben Vortest bzw. Basisaufgaben Nachtest) und Bedingung (grafische Hilfe bzw. formale Hilfe) zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen Vor- und Nachtest,  $F(1, 289) = 187.19$ ,  $p < .001$ . Auch zwischen den Bedingungen kann ein signifikanter Unterschied festgestellt werden ( $F(1, 289) = 4.52$ ,  $p = .03$ ). Dieser ist auf ein zufällig höheres Vorwissen in der Bedingung formale Hilfe zurückzuführen. Die Interaktion von Testzeitpunkt und Bedingung ist marginal signifikant  $F(1, 289) = 3.26$ ,  $p = .07$  (Abb. 6). Die Leistungen im Vor- und Nachtests unterscheiden sich bei der formalen Hilfe mit einer großen ( $d = 0.80$ ), und bei der grafischen Hilfe mit einer mittleren Effektstärke ( $d = 0.57$ ).



**Abb. 6:** Ergebnisse der Basisaufgaben. Die Leistungen im Vortest und Nachtest unterscheiden sich mit mittlerer (grafische Hilfe) und großer (formale Hilfe) Effektstärke.



Bei den Transferaufgaben zeigt die einfaktorielle Varianzanalyse mit dem Vortest als Kovariate keinen signifikanten Unterschied zwischen den Bedingungen ( $F(1, 288) < 1, p = .46$ ) (Abb. 7).

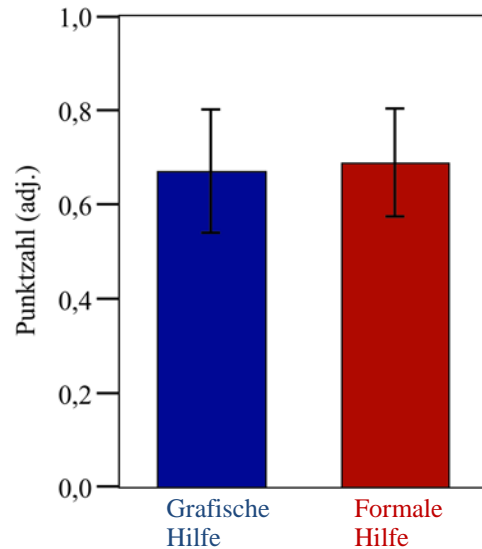
#### 4. Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Unterstützungsmaßnahmen (Kontrastierung + grafische / formale Hilfe) erfolgreich in den Unterricht bereits der achten Jahrgangsstufe einbringen lassen. Die Unterstützungsmaßnahmen erscheinen mit einem signifikanten Lernzuwachs in den Basisaufgaben vom Vortest zum Nachtest mit mittlerer bzw. hoher Effektstärke wirksam.

Bezüglich der Transferaufgaben sind beide Unterstützungsmaßnahmen ebenbürtig.

Es ist erstaunlich, dass Schülerinnen und Schüler bereits der achten Jahrgangsstufe derart schwere Aufgaben gut lösen können.

In dieser Studie zeigt sich, dass die Unterstützungsmaßnahme mit grafischer Hilfe ebenbürtig zur Unterstützungsmaßnahme mit formaler Hilfe ist. Ein zentraler Vorteil der grafischen Hilfe ist ihre Erweiterbarkeit in Richtung Systeme bei energetischen Betrachtungen (Vgl. [7], S. 170 ff), sodass die Unterstützungsmaßnahme aus Kontrastierung und grafischer Hilfe empfohlen werden kann.



**Abb. 7:** Ergebnisse der auf den Vortest adjustierten Transferaufgaben. Es zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Bedingungen.

	Testzeitpunkt	Bedingung	M	SD
Basis	Vortest	Grafische Hilfe	0.59	0.22
		Formale Hilfe	0.53	0.17
	Nachtest	Grafische Hilfe	0.70	0.20
		Formale Hilfe	0.67	0.17
Transfer	Nachtest	Grafische Hilfe	0.69	0.26
		Formale Hilfe	0.67	0.23

**Tab. 2:** Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) für die Bedingungen zu verschiedenen Testzeitpunkten

#### 5. Literatur

- [1] Schecker, Horst; Wilhelm, Thomas; Hopf, Martin; Duit, Reinders; Fischler, Helmut; Haagen-Schützenhöfer, Claudia; Höttecke, Dietmar; Müller, Rainer; Wodzinski, Rita (2018): Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis. Berlin: Springer Spektrum
- [2] American Association for the Advancement of Science (2001): Atlas of Science Literacy: Project 2061. Washington, DC: American Association for the Advancement of Science
- [3] Niedersächsisches Kultusministerium (2015): Kerncurriculum für das Gymnasium Schuljahrgänge 5-10: Naturwissenschaften: [http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/nw\\_gym\\_si\\_kc\\_druck.pdf](http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/nw_gym_si_kc_druck.pdf) (Stand 3/2019)
- [4] Warren, John W. (1979): Understanding Force. London: John Murray
- [5] Böge, Alfred (2013): Technische Mechanik: Statik – Reibung – Dynamik – Festigkeitslehre – Fluidmechanik. Wiesbaden: Springer Vieweg
- [6] IQWST (2013): Physical Science 3: How Will It Move? Force and Motion. Norwalk: SASC LLC

- [7] Müller, Rainer (2009): *Klassische Mechanik: Vom Weitsprung zum Marsflug*. Berlin: De Gruyter
- [8] Wodzinski, Rita (1996): *Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht*. Münster: LIT
- [9] Rittle-Johnson, Bethany; Star, Jon. R. (2011): The Power of Comparison in Learning and Instruction: Learning Outcomes Supported by Different Types of Comparisons. In: *Psychology of Learning and Motivation*, 55, 199
- [10] Backhaus, Udo (2001): Die Kraft ist ein Zwillingsspaar: Beispiele zur Einführung des Wechselwirkungsprinzips in der Schule. In: *Naturwissenschaften im Unterricht/Physik*, 65, 12-14